

Projets du parcours Artem 2A et consignes pour le département *Énergie & Fluides*

Version du 10 juin 2016

L'ordre de présentation des sujets n'importe pas.

Ce catalogue a été distribué aux élèves le 18 novembre. Les projets ont été présentés oralement le 23 novembre, et les choix de projets se sont faits le jour même ; les élèves concernés sont mentionnés à la fin de la section de chaque sujet.

Trois créneaux de projets furent disponibles fin 2015 pour lancer la réflexion sur les sujets. Un rythme de travail plus soutenu, avec, en général, au moins un créneau de projet chaque semaine, a été mis en place à partir de la 2^{ème} semaine de janvier 2016, cf. [l'emploi du temps en section 2 de la page 2A du département](http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/2A), <http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/2A>.

Des soutenances à mi-parcours ont eu lieu le 30 mars 2016.

Le **rapport de projet final** sera envoyé par mel au responsable du département et à tous les tuteurs au plus tard **lundi 6 juin à 12h**. Dans les mêmes délais, un exemplaire imprimé de ce rapport sera déposé dans le casier du responsable de département ¹. Ce rapport fera 20 à 30 pages hors annexes, 30 à 60 pages avec annexes pour le binôme ; 25 à 35 pages hors annexes, 40 à 70 pages avec annexes pour les trinômes. Sous la forme d'un PDF navigable, il devra comporter au moins une annexe. Il devra comporter une bibliographie étoffée ² référencée dans le corps du texte, suivant les consignes de l'**annexe A**. Il présentera de façon *scientifique* le sujet du projet, dans son contexte, le travail effectué, enfin, quelques conclusions et perspectives.

Les **soutenances finales** auront lieu le **vendredi 10 juin en salle P222** :

Heure	Élève(s)	Sujet	Tuteur présent
8h30	Godefroy	R Mesure de la conductivité thermique d'échantillons de taille réduite	Jannot
9h15	De Souza	R Étude de la diffusion et sorption de l'eau dans les membranes de PAC	Perrin
10h15	Perron	R Transition en écoulement de Taylor - Couette non newtonien	Nouar
11h15	Aadil, François, Yvon	1 Évaporation d'une goutte en lévitation acoustique	Castanet

12h10 - 13h30 : *pause déjeuner*

Heure	Élève(s)	Sujet	Tuteur(s) présent(s)
13h30	El Yaagoubi, Glatt	2 Étude numérique d'écoulements de Taylor-Couette non newtoniens	Cheny, Jenny
14h15	Aiex, Bouville, Gauthier	3 Étude du mouvement d'une poudre magnétique	Vinsard

Fin vers 15h10, *retour sur l'évaluation pédagogique globale puis jus de fruits*.

Ci-dessus le programme complet des soutenances est donné, puisqu'on demande à tous les élèves d'assister à toutes les soutenances ³.

Vous préparerez un exposé oral *scientifique* de 25 minutes pour le binôme, 35 minutes pour les trinômes, avec les mêmes items que le rapport (sujet dans son contexte, travail, conclusions et perspectives) mais sur la base d'une **présentation** vidéo PPT ou PDF. Vous évoquerez de plus, au début ou à la fin de votre soutenance, les aspects « *gestion de projet* » de votre travail, en lien avec les recommandations d'Antoine Dubedout présentées dans l'**annexe B**, à considérer dès le début du projet.

Après votre soutenance vous serez soumis à une séance de questions - réponses de la part de vos tuteur et responsable de département.

1. Mon casier se trouve au 1^{er} étage du bâtiment A, à droite de l'ascenseur, en face du bureau A127.

2. Soit n le nombre de références du sujet posé par le(s) tuteur(s) ; si $n \leq 3$ on exige au moins $n + 3$ références, sinon, au moins $n + 1$ références, dont 2 au moins sont nouvelles.

3. Les soutenances d'élèves en parcours Recherche sont indiquées avec un **R**.

1 Étude de l'évaporation d'une goutte en lévitation acoustique

Tuteurs : Guillaume Castanet, CR CNRS

Ophélie Caballina, MC UL

03 83 59 55 30

03 83 59 56 69

guillaume.castanet@univ-lorraine.fr

ophelie.caballina@univ-lorraine.fr

LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

L'*optimisation de la combustion* dans les moteurs automobiles est un enjeu important dans le contexte actuel de *maîtrise de l'énergie* et de *limitation des émissions de polluants* (normes Euro 6). L'*injection directe* diesel (figure 1a) ou essence apporte une économie de carburant en injectant le carburant préférentiellement aux endroits où la combustion a la plus grande efficacité pendant une durée très bien contrôlée. Dans ces systèmes, les caractéristiques du *spray* de carburant ont une grande incidence sur le mélange air/vapeur de combustible qui doit se trouver à une richesse adéquate (légèrement pauvre) lui permettant de bien brûler. L'*évaporation* des gouttes doit s'effectuer très rapidement pour libérer la vapeur de combustible qui alimente la flamme. Les *phénomènes de transfert de chaleur et de masse* au niveau des gouttes durant leur transport dans le spray sont donc très importants à modéliser. Étant donné que des expériences sur des sprays réels sont difficiles à réaliser et à interpréter, des configurations simplifiées ou idéalisées, comme le cas de la goutte isolée, sont souvent préférées. Dans cette étude, on se propose d'utiliser un *lévitateur acoustique* pour suspendre des gouttes sans contact (figure 1b). Un lévitateur acoustique crée une onde acoustique haute fréquence. La « pression de radiation acoustique » qui s'exerce sur un objet placé dans un tel champ peut produire une force qui s'oppose à la pesanteur. La lévitation n'est toutefois possible que pour des petits objets comme des gouttes, de taille très inférieure à la longueur d'onde du champ acoustique. Comme décrit dans Zaitone et al. (2006), la lévitation acoustique peut être un bon moyen pour étudier l'évaporation de gouttelettes millimétriques.

Il s'agit dans ce projet de mener une *étude expérimentale* dans un lévitateur acoustique pour caractériser l'*évaporation d'une goutte*. La variation de diamètre sera mesurée au cours du temps par ombroscopie, grâce à une caméra. La possibilité d'introduire un écoulement d'air rend également possible l'étude de l'effet du transport par *convection*. L'emploi d'un lévitateur amène néanmoins quelques difficultés. La pression acoustique provoque une déformation de la goutte, typiquement, un aplatissement, qu'il faudra étudier (figure 1c). Le champ acoustique provoque également l'apparition d'un écoulement secondaire autour de la goutte qui se manifeste par des tourbillons (figure 1c). L'effet de cet écoulement « acoustique » sur l'évaporation de la goutte devra être étudié. On s'intéressera dans un premier temps à l'évaporation de gouttes constituées de différents liquides purs (eau, éthanol, ...). Cependant, si le temps le permet, on pourra ensuite étendre l'étude à des mélanges (eau-éthanol, ...), et ainsi se rapprocher des carburants réels qui renferment de nombreuses espèces chimiques de volatilités différentes.

Parallèlement à cette étude expérimentale, on s'intéressera à la *modélisation de l'évaporation*, voire, aussi, *des effets acoustiques*. Idéalement, les résultats des modèles, résolus numériquement, seront comparés à ceux des expériences.

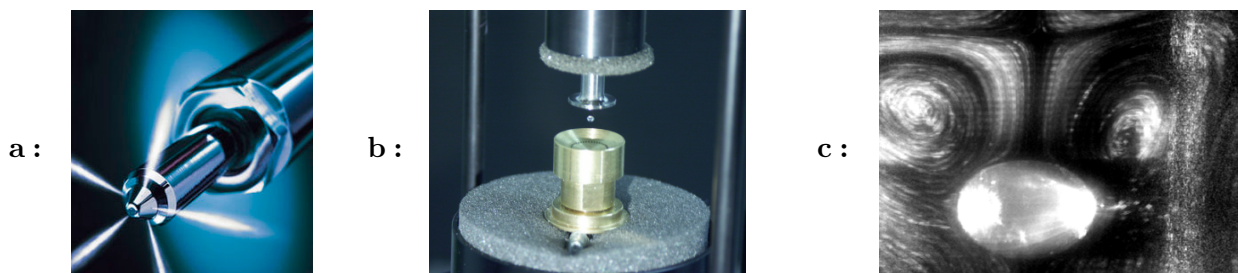


Fig. 1 — **a** : injecteur diesel commercialisé par DELPHI. **b** : lévitateur acoustique actuellement utilisé au Lemta. **c** : goutte ellipsoïdale visualisée par ombroscopie dans une expérience du Lemta; autour de celle-ci, grâce à de la fumée, on visualise les écoulements tourbillonnaires produits dans l'air.

Référence :

ZAITONE, B., HUNSMANN, S., CASTANET, G., DAMASCHKE, N., EBERT, V. & TROPEA, C. 2006 Evaporation of an acoustically levitated droplet. *Com. at ICLASS*.

Élèves ayant choisi ce sujet : Nouçayba Aadil, Charlotte François & Alexandre Yvon.

2 Étude numérique 3D d'écoulements de Taylor-Couette de fluides complexes

Tuteurs : Olivier Botella, MC UL

Yoann Cheny, MC UL

Mathieu Jenny, MC UL

03 83 59 55 94

03 83 59 57 12

yoann.cheny@univ-lorraine.fr

mathieu.jenny@univ-lorraine.fr

LEMMA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Les *écoulements entre deux cylindres coaxiaux*, dits, aussi, de *Taylor-Couette* (figure 2a), qui peuvent, expérimentalement, être très bien contrôlés, sont adaptés à l'étude du comportement des *fluides non newtoniens*. De tels fluides comme des solutions de polymères, des suspensions, etc... se rencontrent fréquemment dans l'industrie. En outre, cette géométrie est aussi rencontrée dans l'industrie comme réacteur pour la polymérisation, pour l'optimisation de mélange de fluides complexes en vue de transfert de masse et de chaleur, et même pour l'extraction de radioéléments par dissolution et mélange. En pratique, le caractère instationnaire et complexe de l'écoulement, une fois les premières instabilités passées, améliore les transferts dans ces procédés. Autant la première instabilité, dans le cas d'un fluide newtonien, est bien connue (Taylor 1923), autant en fluides non newtoniens on dispose de peu de résultats.

Ce type d'écoulement est étudié dans le groupe *Fluides* du Lemta, sur la base d'expériences (Philippe et al. 2012, Bahrani et al. 2015), de méthodes de stabilité (Agbessi et al. 2015), et aussi de *simulations numériques directes*. L'intérêt de telles simulations est de pouvoir prendre en compte des effets fortement non linéaires, des régimes fortement instationnaires voire chaotiques, ainsi que la taille finie du système. Ainsi, le Lemta développe depuis plusieurs années un code de simulation numérique directe dit 'LS-STAG', basé sur une méthode de volumes finis (Cheny & Botella 2010). Ce code a récemment été parallélisé et fonctionne sur le cluster IJL - Lemta Asterix. Dans le cadre du stage 2A de Matthieu Gelot, élève du département EPT de Mines Nancy, effectué entre juin et septembre 2015 au Lemta, une version 3D du code LS-TAG a été validée en configuration de Taylor-Couette pour un *fluide purement visqueux rhéofluidifiant*, au sens où la convergence du code a été prouvée. Un maillage utilisé et une structure calculée sont présentés sur la figure 2. Dans la continuité de ce travail, sont actuellement développés, notamment, dans le cadre du projet 3A EPT de Lei Zhang, des *outils de post-traitement des données* issues du code LS-STAG à l'aide de logiciels comme Matlab ou Mathematica, afin de tracer par exemple les diagrammes spatio-temporels permettant d'identifier les différents régimes de l'écoulement.

Une validation physique complète du code reste cependant à faire, ainsi qu'une étude paramétrique, sur la base de *nouvelles simulations* en *fluide purement visqueux rhéofluidifiant*. En effet, la rhéologie de ces fluides dépend de nombreux paramètres, qu'il s'agit de faire varier dans une « large plage » pour les plus importants. Après une validation par rapport à des études théoriques pour des fluides faiblement

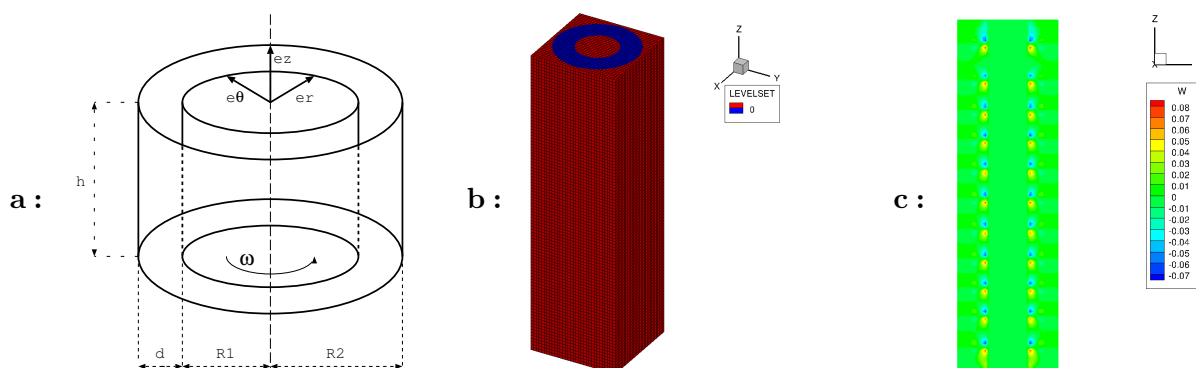


Fig. 2 – **a** : configuration de Taylor-Couette. **b** : maillage LSTAG. **c** : visualisation de vitesse axiale, dans le cas d'un fluide de Cross.

rhéofluidifiants, il sera intéressant d'étudier le cas de fluides plus fortement rhéofluidifiants, pour lesquels des structures instationnaires pourraient apparaître dès la première transition, transition qu'il faudrait caractériser en terme de bifurcation.

Ce projet serait l'occasion d'aborder la mécanique et physique des fluides non newtoniens, tout en travaillant sur l'utilisation, voire, la modification, d'un code de simulation numérique directe performant.

Références :

AGBESSI, Y., ALIBENYAHIA, B., NOUAR, C., LEMAITRE, C. & CHOPLIN, L. 2015 Linear stability of Taylor-Couette flow of shear-thinning fluids : modal and non-modal approaches. *J. Fluid Mech.* **776**, 354-389.

BAHRANI, S. A., NOUAR, C., NEVEU, A. & BECKER, S. 2015 Transition to chaotic Taylor-Couette flow in shear-thinning fluids. *Com.* **69891** au 22^{ème} Congrès Français de Mécanique.

CHENY, Y. & BOTELLA, O. 2010 The LS-STAG Method : A new Immersed Boundary / Level-Set Method for the Computation of Incompressible Viscous Flows in Complex Moving Geometries with Good Conservation Properties. *J. Comp. Phys.* **229**, 1043-1076.

PHILIPPE A.M., BARAVIAN C., JENNY M., MENEAU F. & MICHOT L.J. 2012 Taylor-Couette instability in anisotropic clay suspensions measured using small-angle X-ray scattering. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 254501.

TAYLOR, G. I. 1923 Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A*, 289-343.

Élèves ayant choisi ce sujet : Hamza El Yaagoubi & Romain Glatt.

3 Étude du mouvement d'une poudre magnétique

Tuteurs : Gérard Vinsard & Stéphane Dufour, MC UL
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy
03 83 59 56 68 - gerard.vinsard@univ-lorraine.fr

Descriptif du sujet :

Une *poudre magnétique* est un « *matériau granulaire magnétique* » constitué de particules identiques susceptibles d'acquérir un moment magnétique induit en présence d'un champ magnétique (un aimant attire une de ces particules mais en l'absence de champ magnétique deux d'entre elles n'exercent aucune action l'une sur l'autre).

Les particules étant supposées sphériques, le moment magnétique induit par un champ magnétique uniforme est uniforme et génère un champ magnétique induit dipolaire. Dans l'approximation où le champ magnétique « vu » par une particule est un champ moyen uniforme quelle que soit la complexité du champ magnétique réel, les particules soumises à un champ magnétique extérieur uniforme $\bar{\mathbf{h}}_s = h_s \bar{\mathbf{d}}$ (avec $\bar{\mathbf{d}}^2 = 1$) ont une énergie d'interaction de la forme

$$E = -\frac{\mu_0 \mathcal{M}^2}{8\pi} \sum_n \sum_{m \neq n} \frac{1}{|\bar{\mathbf{x}}_n - \bar{\mathbf{x}}_m|^3} \left(1 - 3 \frac{(\bar{\mathbf{d}} \cdot (\bar{\mathbf{x}}_n - \bar{\mathbf{x}}_m)) (\bar{\mathbf{d}} \cdot (\bar{\mathbf{x}}_m - \bar{\mathbf{x}}_n))}{|\bar{\mathbf{x}}_n - \bar{\mathbf{x}}_m|^2} \right). \quad (1)$$

Dans cette formule $\mathcal{M}$ est le moment magnétique induit (le même pour chaque particule, dépendant de h_s), μ_0 la perméabilité magnétique du vide, $\bar{\mathbf{x}}_n$ la position de la particule n ; les sommes portent sur toutes les particules. Dans cette *approche discrète*, il est donc théoriquement possible d'écrire les équations du mouvement de chacune des particules, compte tenu des autres forces : inertie, pesanteur, impénétrabilité des particules entre elles, frottement visqueux si les particules sont dispersées dans un fluide visqueux (supposé lui immobile) ou encore de Coulomb en cas de contacts avec des solides (particule contre particule ou particule contre paroi). Mais dans la pratique la tâche s'avère difficile dès lors que le nombre de particules devient élevé (quelques centaines avec des moyens de calcul ordinaires).

On préférera donc employer plutôt un *modèle de milieu continu* dans lequel les particules sont considérées par leur densité ρ (nombre de particules par unité de volume) et la perméabilité magnétique moyenne d'un mélange est définie (ce qu'elle n'est pas) par une formule de type Lorenz-Lorentz

$$\mu = \mu_0 \frac{\rho_x + 2\rho}{\rho_x - \rho} \quad (2)$$

où ρ_x est la valeur maximum que peut prendre la densité ρ . Ceci permet d'établir que l'énergie d'interaction magnétique est

$$E = \min_{\psi} \iiint \mu \frac{(\nabla \psi + \bar{\mathbf{h}}_s)^2}{2} d^3x \quad (3)$$

où $\nabla \psi$ décrit en quelque sorte la correction du champ extérieur $\bar{\mathbf{h}}_s$. Comme dans l'approche discrète, il est ensuite possible d'écrire une loi d'évolution de ρ dépendant du milieu dans lequel évoluent les particules. Mais cette fois, au prix d'une discrétisation qui se fait assez simplement avec des éléments finis, on peut obtenir un modèle de calcul effectif du mouvement des particules.

On propose dans ce projet

- une *expérimentation* relativement simple : mettre des particules de magnétites (de dimension de l'ordre de la dizaine de microns) dans un fluide porteur (huile d'olive) et les soumettre à l'action d'un champ magnétique tournant réalisé à partir d'un stator de moteur électrique alimenté par un système triphasé de faible fréquence $\approx 0,1$ Hz (une toute première version de cette expérience existe, cf. la figure 3) ;
- une *modélisation théorique puis numérique*, avec une approche de milieu continu, « énergétique » (reposant notamment sur l'équation 3), et l'utilisation d'un code éléments finis libre, à savoir, Freefem++.

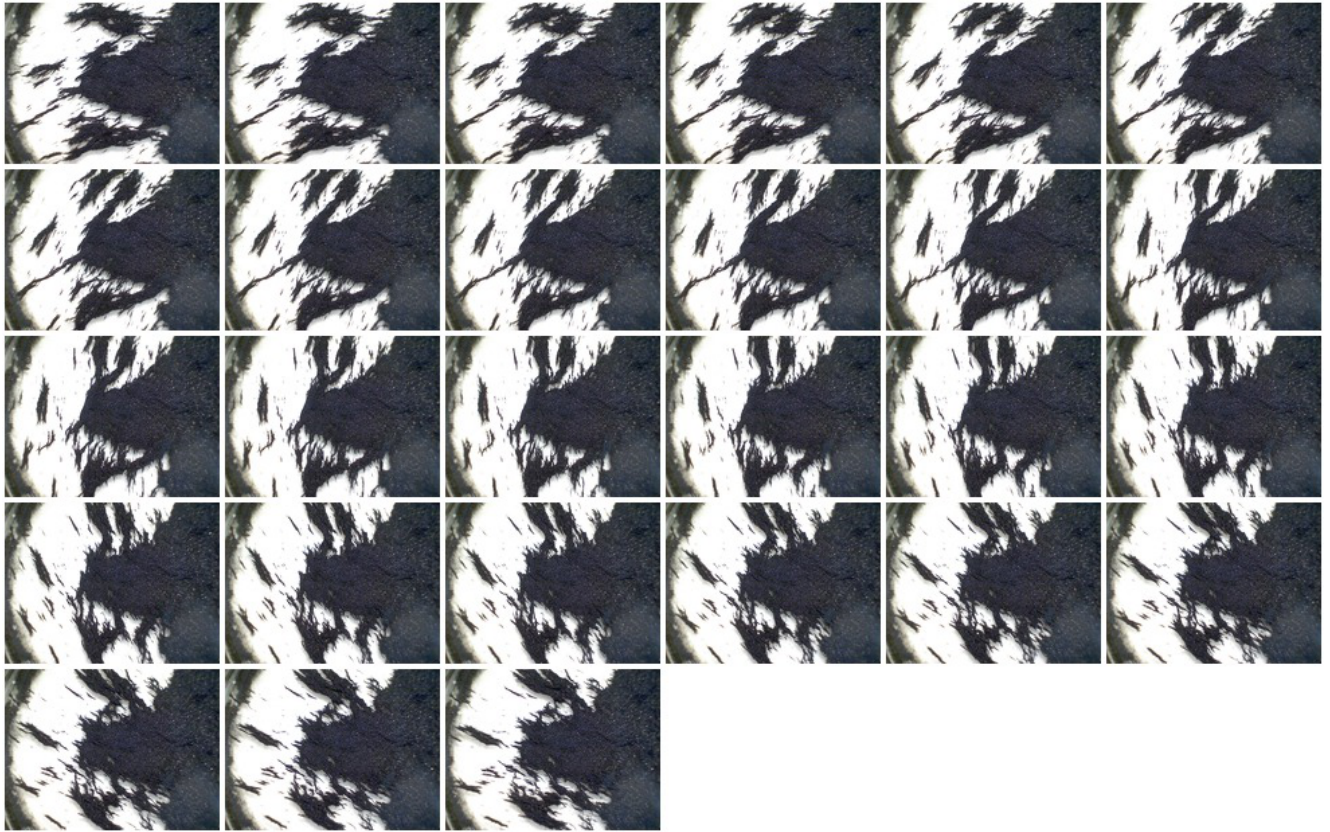


Fig. 3 – Séquence temporelle de photographies des particules de magnétite (en noir) placées dans un champ magnétique uniforme tournant : l'expérimentation n'est pas calibrée, aussi ne donne-t-on pas les temps de capture.

Naturellement, une recherche bibliographique permettra de « démarrer » sur ce sujet⁴, qui offre la possibilité de s'intéresser à des milieux granulaires « magnétiques » de façon expérimentale, et à leur modélisation. En ligne de mire, on peut penser à d'éventuelles applications, même si elles ne sont pas encore clairement définies. Savoir mettre en mouvement des particules magnétiques par un champ magnétique pourrait être utile pour des systèmes de petites échelles, où il n'existe pas de solutions vraiment pratiques pour par exemple débloquer un écoulement granulaire, ou encore réaliser une fonction de mélange. Ce domaine des petites échelles est en phase de développement et on peut raisonnablement espérer que ce type d'« actionneurs magnétiques » saura y trouver sa niche.

Élèves ayant choisi ce sujet : Henrique Aiex, Olivier Bouville & Simon Gauthier.

4. Le choix fait ici est de ne pas donner pas de références a priori, mais il est possible d'en trouver à partir des mots clés '*granular media*' et '*magnetic particles*'.

A Consignes pour la bibliographie

Cette bibliographie doit être étoffée par rapport à celle fournie ici. Pour la présenter, vous suivrez au moins dans ses grandes lignes la norme ISO 690, décrite sur [le document suivant](#)⁵. Vous pourrez aussi vous inspirer de la façon avec laquelle Emmanuel Plaut présente les bibliographies de ses polycopiés⁶.

B Memento gestion de projet

Nous comptons sur les élèves pour mettre en place de bonnes pratiques de *conduite de projet*. En particulier, *après chaque séance projet* affichée à l'emploi du temps, *envoi rapide* (délai $\lesssim 24$ h) aux tuteurs et à tous les élèves du groupe d'un *bref compte rendu du travail effectué* pendant la séance, des *décisions prises* concernant la marche du projet (notamment, répartition des tâches entre les élèves du groupe - projet), enfin, des *propositions pour la séance projet suivante : demande ou rappel de RV*, avec ordre du jour, ou *proposition détaillée de travail en autonomie*.

En sus, nous soutenons la démarche d'A. Dubedout, responsable de la chaire Ingénierie et Innovation⁷, qui demande que tous veillent à ce que les aspects suivants de « *gestion de projet* » soient considérés pendant l'année. Ils devront tous trois être mentionnés ($\simeq 1$ plan vidéo/point) lors de la soutenance finale.

B.1 Connaissance de l'environnement du sujet

Tout le monde reconnaît la nécessité de dresser un tableau de l'état de l'art, et nombre de projets démarrent par une phase de recherche bibliographique. Cette recherche initiale ne doit pas être limitée aux éléments techniques du projet. L'encadrant doit aussi veiller à ce que les étudiants identifient d'une part les ressources sur lesquelles ils pourraient s'appuyer (que ce soit au sein de l'école, des laboratoires d'appui ou de l'entreprise qui « sponsorise » le projet), d'autre part, au delà de leurs tuteurs, qui tirerait bénéfice de leur projet (les fameux clients cachés) et en augmenterait du même coup la valeur.

B.2 Planification

Le futur ingénieur en charge d'un projet doit être capable d'en effectuer une planification préalable. Une séance de formation à la planification est d'ailleurs prévue en début de 2^{ème} année. Les points importants que les élèves doivent mettre en œuvre au cours des projets (parcours Artem ou Recherche) sont :

- L'identification des difficultés et obstacles prévisibles ; l'organisation du projet (par les étudiants) devra permettre de les éviter ou d'en faciliter le franchissement.
- L'identification des principales décisions à prendre au cours du projet ; leur positionnement dans le temps sera la base de la planification.

Il est donc important que les encadrants incitent les élèves à découvrir et anticiper eux-mêmes ces difficultés, et les poussent à présenter le calendrier de leur projet, non pas en terme de cadencement de tâches, mais de décisions à prendre.

B.3 Valorisation des travaux réalisés

Une tendance naturelle dans un projet est de raisonner en « reste à faire ». Dès lors le projet devient très sensible à tout aléa qui se présenterait. Il est au contraire demandé aux encadrants, dans le suivi régulier qu'ils font des projets, de pousser les étudiants à réfléchir à ce qu'ils ont déjà réalisé ; quelles connaissances ont été accumulées, qu'apportent-elles au projet ? En quoi permettent-elles d'en limiter les risques et difficultés futures ?

5. D'Annie Laroche-Joubert ; lien explicite : <http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/bibliographie.pdf> .

6. Une variante de la norme ISO 690 dans laquelle l'année de publication, considérée d'une grande importance, est placée plus tôt, juste après les noms des auteurs. Notez que l'utilitaire bibtex couplé au traitement de texte scientifique LaTeX peut vous aider, cf. <http://emmanuelplaut.perso.univ-lorraine.fr/latex> .

7. Chaire Mines Nancy ; site web www.ingenierie-et-innovation.fr.